

**АЕРОКОСМІЧНІ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА КЕРУВАННЯ**

УДК 621.386

<sup>1</sup>В.П. Харченко, д-р техн. наук<sup>2</sup>О.Г. Кукуш, д-р фіз.-мат. наук<sup>3</sup>В.М. Васильєв, канд. техн. наук**ВИЗНАЧЕННЯ ДОПУСТИМОГО ЧАСУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ  
В СИСТЕМАХ ЗАПОБІГАННЯ КОНФЛІКТІВ В УМОВАХ ВІЛЬНОГО ПОЛЬОТУ**

Інститут інформаційно-діагностичних систем НАУ,  
e-mail: <sup>1</sup>kharch@nau.edu.ua; <sup>2</sup>alexander\_kukush@univ.kiev.ua; <sup>3</sup>v\_vasylyev@ukr.net

*Запропоновано метод послідовної оцінки часу вибору варіанта і прийняття рішення з усунення прогнозованого небезпечного зближення літаків в умовах реалізації нової концепції організації повітряного руху Free Flight. Наведено рівняння оцінки межових моментів часу з використанням методу сплайн-функцій. Отримано інтервальну оцінку, обчисленням довірчого часового інтервалу.*

**Вступ**

Останні досягнення в області зв'язку, навігації і систем спостереження, особливо з використанням супутникових систем, дають підставу розглядати нову концепцію організації повітряного руху Free Flight (Вільний політ) як основну для майбутніх систем керування повітряним рухом (КПР) [1]. Відповідно до концепції Free Flight екіпажам літаків дається свобода вибору траєкторії, швидкості і висоти польоту, що дозволяє більш раціонально і гнучко використати повітряний простір. Упровадження концепції Free Flight може дати економію в декілька мільярдів доларів щорічно за рахунок зниження витрат палива і часу прольоту.

Необхідною умовою при розробці та впровадженні нових концепцій організації повітряного руху є забезпечення безпеки польотів. При цьому повинні вводитися обмеження для того, щоб гарантувати безпечний розподіл літаків у просторі (ешелонування), усувати перевищення пропускної здатності аеропорту, запобігати неправомірному польоту крізь повітряний простір спеціального використання і гарантувати безпеку польоту. Важливу роль у концепції Free Flight відіграє система оповіщення руху і попередження зіткнень літаків у повітрі TCAS (Traffic and Collision Avoidance System), що попереджає екіпаж про можливу конфліктну ситуацію і видає рекомендації щодо її запобігання.

**Аналіз проблеми**

Відмінність концепції Free Flight від існуючих систем навігації й керування повітряним рухом полягає у тому, що відповідальність за ешелонування розподіляється між екіпажами і диспетче-

рами, які працюють разом, спостерігаючи ідентичну інформацію на своїх екранах.

Використання захисних і попереджувальних зон навколо літаків для запобігання зіткнень, а також чітко визначені і розмежовані сфери відповідальності диспетчерів і пілотів, є ключовими елементами концепції Free Flight.

Зрозуміло, що логіка запобігання конфліктів є прогнозованою. Проблемою всіх методів і алгоритмів виявлення і запобігання конфліктів є невизначеність прогнозованого положення літаків, обумовлена похибками оцінки поточної повітряної обстановки, неадекватністю математичних моделей, що описують рух літака, впливом вітру, навігаційними похибками, помилками керування, а також непрогнозованими змінами траєкторії, пов'язаними із корекцією руху пілотом, або наземною системою керування повітряним рухом.

Час прогнозу є найважливішим чинником у системах виявлення і запобігання конфліктів. З одного боку, зі збільшенням часу прогнозу різко знижується достовірність оцінки ситуації. З іншого боку, зі зменшенням часу прогнозу скорочується час прийняття рішення і обмежується кількість можливих варіантів усунення конфлікту. Відомі три градації часу прогнозу для систем виявлення і запобігання конфліктних ситуацій: довгостроковий, середньостроковий і короткостроковий.

Короткостроковий час прогнозу здійснюється до 10 хв. При цьому вплив вітру на майбутнє місцеположення літаків не враховується.

У системах запобігання конфліктів процедуру пошуку і виявлення конфліктів виконують за відомою схемою. Спочатку оцінюють повітряну обстановку за даними, що надходять від системи спостереження.

Через похибки виміру результат оцінки параметрів траєкторії польоту літаків має деякий рівень невизначеності. Далі прогнозують траєкторії, а потім їх попарно аналізують для виявлення тенденцій небезпечних зближень літаків.

Велике значення має вибір критерію виявлення конфліктів.

У системах запобігання конфліктів CAS (Collision Avoidance System) використовується концепція попередження часу – тау-критерій, в основі якої лежить визначення найменшої відстані між двома конфліктуєчими літаками CPA (Closest Point of Approach).

Знаючи CPA, визначають місце, де прогнозується мінімальна відстань між літаками і час польоту, що залишився до найближчої точки між літаками.

Рішення про наявність потенційного конфлікту приймається, якщо відстань між літаками менше встановленого мінімально безпечного значення.

Під час обчислення значення порога виявлення можна враховувати рівень невизначеності прогнозованого місцеположення літака.

Функції виявлення конфлікту і його розв'язання, як правило, розділені. Сигнал виявлення є стартовим для початку роботи алгоритму розв'язання конфлікту.

У статті пропонується метод послідовної оцінки допустимого часу прийняття рішення з усунення загрози небезпечного зближення літаків для алгоритмів короткострокового виявлення і запобігання конфліктних ситуацій.

#### **Логіка послідовної оцінки моментів прийняття рішення**

В основі методу послідовної оцінки прийняття рішень лежать такі положення. Рівні прийняття рішення (рівні попередження) встановлюються залежно від динамічної повітряної обстановки, що складається.

На першому рівні прийняття рішення ніяких заходів щодо запобігання загрози конфлікту можна не вживати. При цьому подаються тільки сигнали попередження.

На другому рівні прийняття рішення для усунення загрози досить виконати один із можливих простих маневрів.

У міру ускладнення ситуації ускладнюється тип маневру і скорочується їхня можлива кількість. Для кожного рівня визначають правила маневрування і тип маневру.

Залежно від ситуації, що складається, визначають рівні прийняття рішення, а для кожного рівня – дистанцію між літаками (дистанцію прийняття рішення), для якої встановлюється

набір можливих варіантів маневрів щодо усунення потенційного конфлікту. Чим далі один від одного літаки, тим більше існує різних варіантів маневрування для запобігання конфліктної ситуації. При цьому маневр може бути здійснений із мінімальною витратою палива і часу.

Однак через наявність досить високого рівня невизначеності прогнозованої траєкторії є ймовірність помилкового виявлення конфлікту. До того ж із часом конфліктна ситуація за якимись причинами може розв'язатися без залучення даного літака.

Важливе значення для прийняття рішення має швидкість розвитку конфліктної ситуації, що залежить від параметрів відносного руху літаків (пересічення, навздогін, зустрічний рух і т.д.).

З кожною дистанцією прийняття рішення пов'язаний певний набір фізично можливих маневрів для даного літака зі збереженням безпечного інтервалу. При цьому перевіряється можливість виникнення конфліктів з іншими літаками в результаті цього маневру. Зміст дистанцій прийняття рішення полягає в тому, що якщо відстань між літаками стане менше заданої дистанції, то кількість варіантів безпечного маневрування зменшиться.

Вибір і прийняття рішення з усунення конфлікту робиться шляхом послідовної оцінки (прогнозування) моментів часу, зближення літаків на встановлені дистанції прийняття рішення. При цьому обчислюється і відслідковується час польоту, що залишився до цих моментів, і видається інформація про можливі маневри, тобто визначається межовий час прийняття рішення з заданого набору можливих варіантів.

У системі запобігання конфліктів повинен відображатися перелік можливих варіантів маневрування і час, що залишився до межового часу вибору варіанта і прийняття рішення.

Така процедура дає можливість більш раціонально вибрати і прийняти остаточне рішення, аналізуючи швидкість зміни (погіршення) ситуації, кількості варіантів і видів маневру.

Розв'язання алгоритму прийняття рішення провадиться після виявлення тенденції зближення траєкторій літаків.

Для оцінки і прогнозування траєкторії руху літаків використовують метод сплайн-функцій на підставі даних, що надходять від системи спостереження.

Під час прогнозування моментів часу зближення літаків на заданій дистанції прийняття рішення провадиться інтервальна оцінка шляхом обчислення довірчого часового інтервалу.

### Оцінка і прогнозування траєкторії польоту

Для реалізації запропонованого методу необхідно попередньо побудувати прогнозовану траєкторію руху літаків на підставі даних спостережень, що надходять у систему запобігання конфліктів, і, як правило, містять випадкові похибки вимірів.

У даній роботі розглядається застосування сплайн-функцій [2].

Траєкторія руху шукається у вигляді вектора-функції  $\vec{r} = \vec{r}(t)$ , усі три компоненти якої є кубічними  $C^2$  – гладкими сплайнами зі спільними вузлами  $\tau_0 < \tau_1 < \dots < \tau_p$ .

Застосування кубічних сплайнів дозволяє відобразити істотні геометричні властивості руху при відносно невеликій кількості оцінюваних параметрів траєкторії. Крім того, методи сплайн-функцій призводять до зручних для реалізації алгоритмів.

У праці [3] у компактній формі отримано вираз для оцінки траєкторії в тривимірній декартовій системі координат за результатами вимірів координат і швидкостей їхньої зміни за умови адитивності помилок вимірів, що беруться незалежними з нульовими середніми значеннями і відомими дисперсіями:

$$\hat{r}(t) = \sum_{i=1}^{p+3} B_i(t) \hat{x}_i, \quad (1)$$

де  $B_i(t)$ ,  $1 \leq i \leq p+3$  – нормалізовані  $B$ -сплайни;  $i$  – індекс, який відповідає правому вузлу носія функції  $B_i(t)$ ;  $\hat{x}_i = [\hat{x}_{i1} \ \hat{x}_{i2} \ \hat{x}_{i3}]^T$  – оцінки коефіцієнтів розкладу трьох координат за базисними сплайнами.

Нормалізований сплайн обчислюється з виразу

$$B_i(t) = (\tau_i - \tau_{i-4}) \sum_{k=i-4}^i \frac{(\tau_k - t)_+^3}{d\omega_{i-4}(\tau_k)/dt}, \quad t \in [\tau_0, \tau_p],$$

де

$$(\tau_k - t)_+^3 - \text{зріз функції } (\tau_k - t)^3:$$

$$(\tau_k - t)_+^3 = \begin{cases} (\tau_k - t)^3, & \text{якщо } t \leq \tau_k; \\ 0, & \text{якщо } t > \tau_k; \end{cases}$$

$$\omega_i(t) = \prod_{j=i}^{i+4} (t - \tau_j).$$

Оцінка кожної координати, наприклад, координати  $y$ , що змінюється зі швидкістю  $v_y$ , здійснюється згідно з виразом

$$\hat{x}_i = W^{-1} \left[ B_i^T \sum_y^{-1} S_t y^* + \dot{B}_i^T \sum_v^{-1} S_t v_y^* \right],$$

$$W = B_i^T \sum_y^{-1} S_t B_i + \dot{B}_i^T \sum_v^{-1} S_t \dot{B}_i,$$

де  $B_i = B_i(t)$  – матриця, визначена в праці [3];

$$\dot{B}_i = \frac{dB_i}{dt}; \sum_y = \text{diag}[\sigma_y^2(t_1), \dots, \sigma_y^2(t_n)] - \text{матриця}$$

дисперсій похибок вимірів координати;  $y^*, v_y^*$  – виміри координати і швидкості її зміни відповідно;  $\sum_v = \text{diag}[\sigma_v^2(t_1), \dots, \sigma_v^2(t_n)]$  – матриця дисперсій похибок вимірів швидкості;  $S_t = \text{diag}[\Delta t_1, \dots, \Delta t_n]$ .

Траєкторії руху з моменту надходження останнього виміру  $t_n$  прогнозують за умови, що  $\tau_{p-1} < t_n < \tau_p$ . При цьому прогнозування траєкторії руху на інтервалі  $[t_n, \tau_p)$  провадиться зі збереженням кубічної залежності на інтервалі  $[\tau_{p-1}, t_n]$ .

З урахуванням того, що при  $t \in [t_n, \tau_p]$  на інтервалі  $[\tau_{p-1}, \tau_p]$  виконується  $B_i(t) = 0$  при  $i \leq p-1$ . Вираз (1) для прогнозування траєкторії руху має вигляд:

$$\hat{r}(t) = \sum_{i=p}^{p+3} B_i(t) \hat{x}_i, \quad t_n \leq t \leq \tau_p. \quad (2)$$

### Визначення моменту зближення літаків на задану дистанцію

Маючи сплайновий прогноз траєкторії (2), екстрапольовану оцінку відстані між двома літаками у фіксований момент часу  $t$  розраховуємо з виразу [3]

$$\hat{R}(t) = \sqrt{\sum_{k=1}^3 \left[ b_{k,1}^T(t) \hat{z}_{k,1} - b_{k,2}^T(t) \hat{z}_{k,2} \right]^2}, \quad (3)$$

$$\tau_{p-1} \leq t \leq \tau_p,$$

де  $k$  – індекс, що визначає одну координату з декартової системи координат; 1, 2 – відповідно перший, другий літак;  $b_k(t) = [B_i]_{i=p}^{p+3}$  – вектор значень  $B$ -сплайнів;  $z_k = [x_{ik}]_{i=p}^{p+3}$ ;  $\hat{x}_{ik}$  –  $k$ -та компонента вектора  $x_i$ .

При цьому  $k$ -та компонента вектора  $r(t)$  дорівнює

$$r_k(t) = b_k^T(t) z_k.$$

Використовуючи вираз (3) для заданої відстані прийняття рішень  $d_{np} = \hat{R}$ , визначаємо час, що відповідає моменту  $t_{d_{np}}$  досягнення літаками цієї дистанції поділу.

### Оцінка межового моменту прийняття рішення

Оцінка межового часу прийняття рішення для заданого типу ситуацій повинна провадитися з урахуванням помилки прогнозування. Така оцінка вимагає переходу від точкової сплайнової оцінки (2) до інтервальної оцінки у вигляді довірчого інтервалу за часом.

Довірчий інтервал за відстанню з імовірністю не менш  $1 - \alpha$  при сплайновому прогнозуванні відстані між літаками за умови, що похибки вимірів мають гауссів розподіл, оцінюємо за виразом [3]

$$\Delta R(t) \leq u(t) \sqrt{(\chi_{24}^2)_\alpha}; \quad (4)$$

$$\Delta R(t) = |R(t) - \hat{R}(t)|;$$

де  $(\chi_{24}^2)_\alpha$  –  $\alpha$ -квантиль  $\chi_{24}^2$ -розподілу для 24 степенів вільності ( $6 \times 4 = 24$ ):

$$P\{\chi_{24}^2 > (\chi_{24}^2)_\alpha\} = \alpha;$$

$$u(t) = \sqrt{\sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^2 [D_{k,j} b_{k,j}(t), b_{k,j}(t)]};$$

$j$  – індекс, що відповідає одному з двох літаків;

$D_k$  – кореляційна матриця вектора  $\hat{z}_k$ .

Оцінка меж довірчого інтервалу (4) щодо прогнозованого значення відстані між літаками  $\hat{R}(t)$  обчислюється для фіксованого моменту часу.

Для заданої дистанції прийняття рішення  $d_{\text{пр}}$  цей час розраховується і дорівнює  $t_{d_{\text{пр}}}$ .

Перейдемо від довірчого інтервалу за відстанню (4) до довірчого інтервалу за часом відносно моменту  $t_{d_{\text{пр}}}$ , який відповідає часу досягнення прогнозованої різниці відстаней між літаками.

Для ряду послідовних фіксованих значень часу вираз (4) визначає межі довірчої смуги щодо оціненого (прогнозованого) значення відстані між літаками:

$$d(t) = \hat{R}(t);$$

$$\hat{R}(t) - \Delta R \leq d(t) \leq \hat{R}(t) + \Delta R.$$

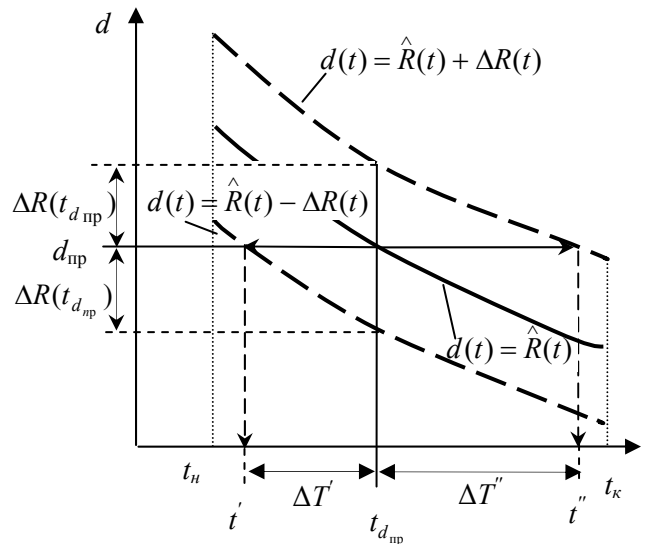
Рівняння межових ліній довірчої смуги за відстанню є функцією часу. Отже, для фіксованої відстані  $d_{\text{пр}}$  може бути визначене відповідне межове значення часу як для однієї межі довірчої смуги, що описується рівнянням

$$d(t) = \hat{R}(t) - u(t) \sqrt{(\chi_{24}^2)_\alpha}, \quad (5)$$

так і для іншої межі, що задається рівнянням

$$d(t) = \hat{R}(t) + u(t) \sqrt{(\chi_{24}^2)_\alpha}. \quad (6)$$

Ілюстрація процедури знаходження меж часового довірчого інтервалу за межами довірчого інтервалу за відстанню показана на рисунку.



Межі часового довірчого інтервалу

У загальному випадку довірчий часовий інтервал несиметричний відносно часу  $t_{d_{\text{пр}}}$ , тобто

$$\Delta T' \neq \Delta T''.$$

Розв'язком рівняння (5) є час  $t'$ , а рівняння (6) – час  $t''$ .

При знаходженні коренів рівнянь можлива ситуація, коли для сплайнової оцінки, визначеної для інтервалу часу

$$t \in [t_n, t_k],$$

один чи обидва корені не існують.

У цьому випадку межі часового інтервалу можна оцінити приблизно, знаючи швидкість зміни відстані між літаками  $v_R$  і вважаючи її сталою:

$$\Delta T' \approx \frac{\Delta R}{v_R}.$$

Для системи прийняття рішень дається завдання не запізнитися з прийняттям рішення, тому має сенс визначати тільки одну межу часового довірчого інтервалу як момент часу  $t'$ , тобто найменшого часу до моменту, коли відстань між літаками буде дорівнювати  $d_{\text{пр}}$ .

Для пошуку межового моменту прийняття рішення  $t'$  може бути застосований такий ітеративний алгоритм, що записується операторами:

```

 $d_{np} = \hat{R}(t_{d_{np}});$ 
 $\tau = 0;$ 
while  $(\hat{R}(t_{d_{np}} - \tau) + \Delta R(t_{d_{np}} - \tau)) > d_{np}$  do
 $\tau = \tau + \Delta \tau;$ 
end
 $t' = t_{d_{np}} - \tau.$ 

```

Ідея алгоритму полягає в тому, що виконується зсув часу вліво (по осі часу) на крок  $\Delta \tau$  відносно прогнозованого моменту часу  $t_{d_{np}}$ , відповідного досягненню заданій дистанції прийняття рішення  $d_{np} = \hat{R}(t_{d_{np}})$ . Для кожного фіксованого часу  $t_{d_{np}} - \tau$  розраховується прогнозоване значення відстані  $\hat{R}(t_{d_{np}} - \tau)$  і верхня межа довірчого інтервалу:

$$\hat{R}(t_{d_{np}} - \tau) + \Delta R(t_{d_{np}} - \tau).$$

З кожним новим кроком ітерації межа довірчого інтервалу за відстанню зсувається ліворуч по осі часу. Це продовжується, доки ця межа не досягне  $d_{np}$ . При цьому фіксується сумарна величина зсуву  $\tau$ . Отже, часова межа прийняття рішення визначається як  $t' = t_{d_{np}} - \tau$ .

### Висновки

Запропонований метод послідовної оцінки допустимого часу прийняття рішення з усунення загрози небезпечного зближення літаків для заданих рівнів попередження може бути використаний у бортових системах запобігання конфліктів, наземних автоматизованих системах керуван-

ня повітряним рухом, а також при кооперованому керуванні повітряним рухом під час реалізації концепції Free Flight, коли відповідальність за безпеку польотів розподіляється між екіпажем і наземною складовою системи організації повітряного руху.

Особливістю методу є визначення рівнів прийняття рішення, послідовна прогнозна оцінка межового моменту часу прийняття рішення за вибором типу маневру для усунення конфлікту.

Для реалізації методу обґрунтовано необхідність переходу від інтервальної оцінки прогнозу за відстанню до інтервальної оцінки за часом і наведено вирази для оцінки меж довірчого часового інтервалу.

Для практичної реалізації методу потрібно буде обґрунтоване визначення ряду значень дистанцій прийняття рішення (або інтервалів часу).

Розв'язок цієї задачі з урахуванням характеру взаємного руху літаків, їхніх динамічних характеристик і планів польотів є предметом подальшого дослідження.

### Список літератури

1. *RTCA*; Report of the RTCA Board of Directors Select Committee on Free Flight, Jan. 18, 1995: RTCA Washington DC.
2. *Зав'ялов Ю.С., Квасов Б.И., Мирошніченко В.П.* Методы сплайн-функций. – М.: Наука. – 1980. – 350 с.
3. *Харченко В.П., Кукуш О.Г., Бабак Є.А., Загора С.А.* Класифікація конфліктних ситуацій між літальними апаратами та вибір зон безпеки. // Вісн. НАУ. – 2002. – №3. – С. 79–88.

Стаття надійшла до редакції 10.03.04.

В.П. Харченко, А.Г. Кукуш, В.Н. Васильев

Определение допустимого времени принятия решений в системах предотвращения конфликтов в условиях свободного полета

Предложен метод последовательной оценки времени выбора варианта и принятия решения по устранению прогнозируемого опасного сближения самолетов в условиях реализации новой концепции организации воздушного движения Free Flight. Приведены уравнения оценки граничных моментов времени с использованием метода сплайн-функций. Дана интервальная оценка, полученная вычислением доверительного временного интервала.

V.P. Kharchenko, A.G. Kukush, V.N. Vasylyev

Determination of allowable time for decision making in Collision Avoidance Systems in Free Flight Environment

A method of a sequential time evaluation of choice of variant and decision making to avoid predicted dangerous approach of the aircraft at implementation of Free Flight concept in air traffic management is presented. Expressions for an evaluation of boundary instants by using the spline method are derived. Interval estimation is given by calculation of a confidence time interval.